日间光暴露对睡眠的优化效果及作用机制*

何美亨 [1,2] 汝涛涛 [2] 李乐 [3] 李丝雨 [1,2] 张辰泽 [1,2] 周国富 [2,3]

([1] 华南师范大学心理学院, 光与身心健康实验室, 广州 510631)

([2] 华南师范大学, 国家绿色光电子国际联合研究中心, 广州 510006)

([3] 华南师范大学, 华南先进光电子研究院, 广州 510006)

摘要 光照作为最重要的授时因子，对机体的昼夜节律与睡眠具有显著的调节作用。已有研究发现日间更多的光照暴露，特别是晨间高强度光照会显著促进个体的夜间睡眠，但这一优化效果会受到光照参数和个体特征等的调节。日间光照可以通过前置或延迟机体的生物节律进而对睡眠产生间接影响；而日光暴露是否会通过调节睡眠内稳态压力直接影响睡眠尚不明晰。未来研究可探究日光水平与时间对睡眠的交互影响，面向特定人群如长期室内办公者、轮班工作人员或睡眠障碍群体构建健康人因照明模式。

关键词 日间光照，睡眠，健康照明，作用机制，生物节律

睡眠对个体的成长和发展具有重要意义。但在现实生活中，存在睡眠问题如慢性睡眠限制、失眠或睡眠效率低下等的人群范围越来越广且有低龄化倾向。有研究分析表明，睡眠障碍在我国十分普遍(Li et al., 2018; Lu et al., 2017)，特别是在新冠疫情期间，睡眠问题尤为突出(Li, Zhou, et al., 2021)。而不良的睡眠又与情绪障碍(Emens et al., 2020)、高血压(Wang et al., 2020)、糖尿病(Cappuccio et al., 2010)等一系列身心健康问题密切相关。因此，改善睡眠品质，对于提升国民身心健康水平具有十分重要的社会价值。

光照作为人们生活中必不可少的环境因素，无处不在。作为所有哺乳类动物内在生物节律最为重要的授时因子，环境光在调节机体昼夜节律的同时也会对个体的睡眠产生影响(Blume et al., 2019; Prayag, Munch, et al., 2019)。研究发现，长期处于光线不足或不合理光暴露环境下，个体会出现生物节律紊乱、睡眠质量低下以及情感障碍等健康问题(Khaing et al., 2019; van Duijnhoven et al., 2019)。为此，越来越多的研究者开始探讨日间光暴露与夜间睡眠的关系，而基于这些研究成果构建“以人为本”的室内健康照明环境(Human Centric Lighting,

收稿日期：2022-08-21

* 广州市科技计划(2019050001; 2021 to RT)、广东省光信息材料与技术重点实验室(2017B030301007)、广州市电子纸显示材料与器件重点实验室(201705030007)、国家高等学校学科创新引智计划 111 引智基地项目、华南师范大学心理学院研究生科研创新基金资助项目(PSY-SCNU202120)。

通信作者：汝涛涛，E-mail: taotao.ru@m.scnu.edu.cn

HCL)可以在满足个体视觉工作需求的同时，优化夜间睡眠、提升心理幸福感，不失为一种有效且重要的干预策略。因此，本文将从光照的生物节律效应的角度，对日间光照对夜间睡眠的作用效果，制约因素及潜在机理等方面进行系统梳理与探讨。

1 光照的生物节律效应

光照通过视觉神经通路帮助我们形成视觉功能(Image forming function)的同时，也会通过哺乳动物视网膜特有的第三类新型感光细胞—内在光敏性神经节细胞(intrinsically photosensitive retinal ganglion cells, ipRGCs)对个体心理功能产生显著的激活作用，如警觉性(Smolders et al., 2018; Souman et al., 2018)、认知功能(Huiberts et al., 2015; Ru et al., 2021)、情绪(Bedrosian & Nelson, 2017; Ru, et al., 2019; 李芸 等, 2022)等，与此同时，也会对机体的激素分泌(Figueiro & Rea, 2012)、生物节律和睡眠产生显著的调节作用(Cajochen, Freyburger, et al., 2019; Nie et al., 2020)，这些被统称为光照的非图像视觉功效(Non-image forming function，NIF)(汝涛涛 等, 2019)。其中，光照对生物节律和睡眠的调节又被称为光照的生物节律效应。

2 光照对生物节律的调节

人类的睡眠觉醒周期是昼夜节律行为模式的一个突出表现(Blume et al., 2019)，而光作为重要的授时因子，对这一睡眠觉醒周期具有重要影响(Dautovich et al., 2019)。位于下丘脑的视交叉上核(suprachiasmatic nucleus, SCN)是人体生物节律系统的重要起搏器，光照通过ipRGCs 将光信号传递至 SCN，从而对个体的生物节律进行调节。

基于生物节律的角度，有研究认为光照对人类生理节律有两方面的影响：光照对褪黑激素的急性抑制反应和光照对昼夜节律相位的调节(Blume et al., 2019)。研究发现，环境光对生物节律的重置效果依赖于光照作用的时间。一方面，晨间光暴露可以前置个体生物节律相位(Dumont & Carrier, 1997; Misiunaite et al., 2020)。如早期一项研究发现在接受为期 3 天的晨间亮光暴露(8:30~13:30, 6000~13000 lx)后，被试的生物节律相位提前了约 1.2 小时(Dumont & Carrier, 1997)。新近的一项研究发现，日间(8:00~18:00)办公室采用优化动态光模式(早上最低为 500 lx，中午逐渐增加到最低 1000 lx，下午降低且最高不超过 2500 lx)较之于传统办公照明模式显著提前了被试的褪黑素开始分泌时间(Benedetti et al., 2022)。另一方面，夜间光暴露则会延迟个体生物节律相位(Dumont & Carrier, 1997; Hartstein et al., 2022; Khalsa et al., 2003)。如 Dumont 和 Carrier (1997)的研究发现，在夜间光暴露下(18:30~23:30, 6000~13000 lx)被试的生物节律相位延迟了约 1.6 小时。另一项研究也发现在夜间持续 6.7 小时约 10000 lx 强光作用下个体褪黑素的相位反应时间延迟了约 3.6 小时(Khalsa et al., 2003)。由此提示，

光照作为重要的授时因子，可以前置或延后机体的生物节律相位，从而间接对个体睡眠觉醒活动模式产生影响。

3 光照对睡眠的影响

在探讨光照与夜间睡眠关系的研究中，研究者通常会采用客观和主观两种测量方式评估睡眠。主观睡眠一般通过睡眠日志、睡眠量表等测量，客观睡眠多通过佩戴腕表，或者通过睡眠测量的金标准—多导睡眠监测仪(polysomnographic, PSG)等来监测。主观睡眠参数主要包括睡眠开始时间、入睡潜伏期、睡眠效率、睡眠时长和睡眠中点等；而通过 PSG 等设备的监测除了能获取上述指标外，还能获得不同睡眠结构特点与其他睡眠活动，如睡眠纺锤波数量、慢波睡眠(slow wave sleep, SWS)、快速眼动睡眠(rapid eye movement sleep, REMS)的持续时间与潜伏期等更加微观参数。此外，与睡意和警觉度密切相关的生化指标如褪黑素和皮质醇浓度等也是衡量睡眠的客观指标之一。光照的非视觉效应存在明显的时间效应(time of day)。因此，光照与睡眠的关系研究通常分为日间与夜间两个方面。

3.1 夜间光照对睡眠的影响

由于人工照明技术的迅速发展，人类“日出而作，日落而息”的自然行为模式早已被打破，人工白昼现象日益普遍，再加上夜间各类电子显示产品的广泛使用，对人们的睡眠健康产生了极大危害。总体而言，研究结果较为一致地提示，夜间光暴露会对睡眠产生负性影响，包括延长入睡潜伏期、减少深度睡眠的时长、增加夜间睡眠扰动等(Cho et al., 2018; Cho et al., 2013; Obayashi et al., 2014)。早期一项研究发现夜晚的光照水平越亮，暴露时间越长，个体进入睡眠的准备时间则越长(Obayashi et al., 2014)。与之类似，一项实验室研究采用 PSG 监测被试在整晚暗光暴露下(40 lx)的睡眠情况，结果发现，尽管光照强度很低，但较之于接近黑暗的控制条件，被试 N1 期睡眠时长与清醒次数显著增加，慢波睡眠显著减少(Cho et al., 2013)。此外，如前文所述，个体视网膜上的 ipRGCs 细胞的最敏感波长接近蓝光，夜间短波长蓝光或富含蓝光的复合白光暴露会睡眠产生更大的干扰。如最近一项研究考察了夜间在相同照度(160 lx)下，睡前 1 小时(21:30~22:30)不同蓝光含量的复合白光(2000 K vs. 6000 K)暴露对青少年睡眠的影响。结果显示，与低蓝光环境相比，持续 10 天的富含蓝光环境作用下青少年的睡眠质量显著更低，次日晨间主观警觉性也显著更低(Wen et al., 2021)。而上述这种蓝光危害即使在很低强度的光线下也依然显著。如睡前使用 iPad 阅读两小时(~30 lx，峰值在~450nm)较之于纸质书阅读(~3 lx，峰值在 612nm)足以导致显著更低的睡前睡意、更长的入睡潜伏期、更短的 REM 睡眠时长和次日晨间更高的困倦水平(Chang et al., 2015)。而夜

间光照对睡眠的影响被认为主要是通过延迟机体生物节律、抑制褪黑素分泌等生理过程来产生(Blume et al., 2019)。

3.2 日间光照对睡眠的影响

3.2.1 日间光暴露与夜间睡眠的相关研究

不同于夜间光照对睡眠的负面影响，研究发现日间光照能够显著改善夜间睡眠质量。如研究者考察了在真实生活情境中，日间光照强度对绝经后妇女情绪和睡眠的影响，结果发现，日间平均光照强度与主客观睡眠潜伏期、主观入睡困难、客观入睡后清醒次数等指标呈负相关，同时与主观抑郁评分呈负相关(Youngstedt et al., 2004)。另一项研究结果发现，24 小时内的平均光强度与有晚睡偏好的青少年客观入睡时间及次日清醒时间呈负相关；最后暴露在>10 lx 的时间与客观入睡时间呈正相关，与主客观的整体睡眠时长呈负相关(Gasperetti et al., 2021)。此外，有田野研究考查室内办公环境中员工日间光暴露与睡眠的关系，结果发现，日光暴露总量与主观睡眠质量呈正相关(Hubalek et al., 2010)。而 Boubekri 等人(2014)的研究进一步发现，靠窗工位办公的员工会接触到更多光线，主观报告身心更健康、睡眠质量更高及客观睡眠时长更长。Figueiro 等人(2021)在疫情期间的调查研究也发现，白天(室内或者室外)接触的光照暴露量越多，个体自我报告的睡眠越好。

此外，部分田野研究提示光照暴露与睡眠关系存在显著的季节(time of year)与时间(time of day)效应(Figueiro & Rea, 2016; Figueiro et al., 2017; Gasperetti et al., 2021; Wams et al., 2017)。如 Figueiro 和 Rea (2016)的田野研究比较了冬季和夏季办公室日间(8:00~17:00)的光照水平及其与睡眠的关系，结果发现夏季较之于冬季日间光照量显著更多；夏季的客观睡眠质量(入睡潜伏期、睡眠时长和睡眠效率)也显著优于冬季。然而也有研究报告了不一致的结果，如一项针对 65 岁以上老年人的调查研究发现，虽然夏季日光暴露量显著高于冬季，但主观睡眠质量在夏冬季之间并无显著差异(Flores-Villa et al., 2020)。除季节差异外，日间不同时间点光照作用对睡眠的影响也存在差异。如上述 Youngstedt 等人(2004)发现晨间(清醒后 4 小时内)平均光照强度与主客观睡眠时间及主观睡眠质量呈正相关；与主客观睡眠潜伏期、主观入睡困难及主观睡眠中清醒次数等呈负相关。而 Figueiro 等人(2017)基于真实办公场景的研究发现员工日间接触的昼夜节律光照(circadian light, CL_A)水平越高(富含短波长的亮光)，其睡眠质量越高；进一步分析发现早上(8:00~12:00)接触更高 CL_A 水平的员工较之于低 CL_A 水平的员工，其入睡潜伏期更短，睡眠效率更高，且主观睡眠质量也显著更高(Figueiro et al., 2017)。同样地，Gasperetti 等人(2021)也发现晨间(4:00~9:00)的光照暴露水平越高，客观入睡时间及次日清醒时间越早；下午(14:00~19:00)光照暴露水平越高，第二天清醒时间也越早；

而晚上(19:00~半夜)光照暴露水平越低，主观睡眠时间越长；但并未发现早上 9:00 到下午 14:00 间的光照暴露水平与主客观睡眠指标的显著相关。

总体而言，上述田野研究结果较为一致地提示，日间较高强度的光照或更多的光暴露量与夜间睡眠积极关联。同时，日间光照对睡眠的影响依赖于光照作用时间，即接触光暴露的时间越早，晨间高强度光暴露越多，夜间的睡眠情况越好。但值得注意的是，基于田野研究的证据凸显了日间光照与睡眠的相关关系，但无法揭示两者之间是否存在因果关联。

3.2.2 短时程日光影响夜间睡眠的实证研究

为了探究日间光照与睡眠的因果关系，研究者通过真实办公场景或实验室情境下的实证研究考察了日间光照对夜间睡眠的影响(表 1)，但研究结果并不十分一致。如早期一项研究发现，晨间(6:00~9:00)亮光(2000 lx)或暗光(1 lx)作用下被试的客观入睡时间、入睡潜伏期和主观睡眠质量均无显著差异，但在晨间亮光较之于暗光暴露下被试清醒时间显著更早(Dijk et al., 1987)、N2 期睡眠时间与 REM 期的数量显著更少(Dijk et al., 1989)。最近国内一项对长时室内学习大学生的田野干预研究发现，为期 5 天(8:00~9:30)的晨间亮光作用(1000 lx, 6500K)较之于控制光(300 lx, 4000K)显著提高了大学生的睡眠效率，降低了睡眠碎片化指数(He et al., 2022)。此外，有研究发现，在冬季对南极哈雷研究站的研究人员进行为期 14 天的晨间亮光干预(8:30~9:30，5300K)，参与者的睡眠效率、入睡潜伏期和碎片化指数与对照条件相比并未显著变化，但其入睡清醒时间与生物节律显著提前(Corbett et al., 2012)。而最近一项干预研究对比了上午(6:00~12:00)两种不同的视黑素等效日光照度(melanopic equivalent daylight illuminance, mel EDI, 即 192 mel EDI vs. 44 mel EDI)对早班工人睡眠的影响，结果并未发现两种照度下睡眠各项指标的显著差异；但与基线光相比，高 mel EDI 干预后被试的入睡潜伏期缩短，睡眠效率提高(van de Putte et al., 2022)。

此外，有临床研究采用晨间亮光暴露对有睡眠障碍问题的患者进行干预治疗(Dowling et al., 2005; Raikes et al., 2020; Turco et al., 2018; Zalta et al., 2019)。如 Raikes 等人(2020)采用 30min 的晨间(8:00~10:00)蓝光暴露(~480 nm)治疗脑损伤患者的睡眠障碍问题，结果发现在 6 周干预后，患者白天睡意和抑郁情绪的严重程度较基线明显缓解，且睡眠潜伏期缩短，睡眠质量显著提高。另一项采用晨间亮光干预治疗原发性胆管炎患者睡眠障碍的研究发现，在 15 天的晨间亮光干预(照度 10000 lx，起床后立即暴露 45min)后，干预组入睡和清醒时间提前，主观睡眠质量显著提高(Turco et al., 2018)。但也有研究未发现晨光干预的积极作用。如 Dowling 等人(2005)对阿尔兹海默症患者的睡眠问题进行了为期 10 周的晨间亮光干预(> 2500 lx, 9:30~10:30)，然而与控制组(150~200 lx)相比，并未发现患者整体睡眠情况有明显提

升。这些不一致的结果可能是由于患者群体之间的差异性导致。

3.2.3 全天化日光影响夜间睡眠的实证研究

除了短时程日光暴露，也有研究考察了长时程人工光暴露对睡眠的影响(表 1)。如 Wakamura 和 Tokura (2000)考察个体醒后到睡前连续 4 天的亮光(6000 lx)和暗光(200 lx)暴露对核心体温和睡眠的影响。结果发现，尽管亮光较之于暗光条件下被试的上床时间、清醒时间和床上时间无显著差异，但主观睡眠体验更好，睡意评分更低。与此同时，Stefani 等人(2021)在严格控制的实验室条件下对比了全天化(醒后至睡前)的动态光与静态光对日间认知功能与夜间睡眠的影响，其动态光的设置为早晨醒后，光照从 1 lx, 3500 K 逐渐增加，在 2.5h 后达到 83 lx, 5000 K 并保持不变，持续 7.5h 后逐渐降低至睡前 1 lx, 2700 K；静态光固定在 87 lx, 4000 K。结果发现，动态光较之于静态光模式下认知加工绩效无显著改善，但被试 N1 期和 N2 期睡眠的潜伏期显著缩短；同时静态光较基线夜相比，夜间褪黑素分泌时间显著延迟，而动态光下无明显差异(Stefani et al., 2021)。新近，国内学者 Ru 等人的一项实验室研究发现，较之于全天(9:00~18:00)静态的办公照明环境(4000K, 500 lx)，分别在晨间(9:00~10:30)和下午早间(14:00~15:30)施加高照度富蓝白光(6500K, 1650 lx)，午间(12：00~14：00)采用低照度暖白光(300lx, 3000K)组合的动态办公光环境能显著提升个体夜间的睡眠质量及日间部分时段的认知绩效(Ru et al., 2022)。

除了上述的实验室研究外，另一些研究在真实办公场景中操纵了人工或自然采光水平并考察其对员工心理幸福感与睡眠的影响，尽管研究结果也不一致(表 1)，但为我们更加客观地评估日光与睡眠的关系提供了生态化视角。如 Figueiro 等人(2020)在办公室场景下分别在上午(6:00~12:00)进行蓝光(眼位 50 lx, 455nm)暴露，中午(12:00~13:30)亮白光(200 lx, 6500K)暴露，下午(13:30~17:00)红光(眼位 50 lx, 634nm)暴露，结果发现，光照干预后被试睡眠的起止时间较基线均显著提前。此外，还有研究设计了两种室内动态照明方案来考察动态家居照明对老年人睡眠的影响。两种方案的照度水平相同(早上 6:00~8:00 为 300lx，8:00~12:00 为 500 lx，之后逐渐降低至晚上 20:00 为 100 lx)，但方案一的色温保持 2700K 恒定，而方案二的色温在 6500K 到 2700K 之间变化(6:00~8:00 为 4500K，8:00~12:00 为 6500K，12:00~16:00 为 4500K，16:00~18:00 为 3500K，18:00~20:00 为 3000K，20:00 之后为 2700K)。结果发现方案二下老年人的客观睡眠时长更长，睡眠效率更高，入睡潜伏期更短，且主观报告的睡眠问题更少，睡眠质量更高(Shishegar et al., 2021)。然而其他一些田野干预研究却报告了不一致的结果。如 Peeters 等人(2021)分别在冬季和春季，对真实办公场景在上午(8:30~12:30)或下午(13:00~17:00)进行高照度(垂直: 318 lx, 3676K, 190 lx mel EDI)或低照度(垂直: 42 lx,

3264K, 22 lx mel EDI)的动态光干预，结果并没有发现动态光对夜间睡眠的显著作用，甚至出现相反的结果，如在冬季，上午高照度较之于下午高照度的动态光模式导致睡眠时长显著缩短，睡眠时间显著推迟。最近一项田野研究设计了两种相反的动态光照模式，其中一种光照模式(Skeleton)在早上 7:00~10:15 和下午 15:45~19:00 之间是亮光暴露(垂直: 502lx, 4689K, 367 lx mel EDI)，在 11:15~14:45 之间是基线光暴露(垂直: 333lx, 5105K, 264 lx mel EDI)；另一种光照模式(Noon)正好相反。结果发现主观睡意在 Noon 模式下更低，但睡眠参数(如入睡时间，睡眠时长，睡眠效率等)并未发现显著差异(Kompier et al., 2022)。

综合以上，虽然部分研究发现了日间光照对夜间睡眠的优化效果，但不同研究发现的日间光照暴露对睡眠影响的结果并不十分一致。除了研究场景与采用睡眠测试指标的差异，动态光模式、参数水平及与被试群体特征等可能是潜在的调节因素。此外，对全天动态光照影响夜间睡眠的实验室研究较少，何种动态光模式可以更好的优化夜间睡眠仍需进一步探讨。

表 1. 日间光照对睡眠的影响

	被试特征	光照参数	光照时间	作用时长	睡眠测量指标	结果
短时程-实验室						
Dijk et al., 1987	成年人	亮光：2000lx；暗光：1lx	早晨 6~9 点	3h×4days	PSG	亮光下睡眠时长↑ 入睡时间和入睡潜伏期 NS
Dijk et al.,1989	成年人	亮光：2000lx；暗光：1lx	早晨 6~9 点	3h×4days	PSG；褪黑素；GSQS	亮光暴露下睡眠情况↑ 主观睡眠质量 NS
He et al., 2022	成年人	亮光：眼位 1000lx，6500K；对照光：眼位 300lx，4000K	8:00~9:30	1.5h×5days	腕表；睡眠日志；GSQS	亮光下睡眠效率↑碎片化指数↑入睡潜伏期↑
短时程-田野						
Corbett et al., 2012	南极站研究员	5300K	8:30~9:30	1h×14days	腕表	睡眠觉醒周期提前
Kohsaka et al., 2000	老年人	亮光：6000lx；控制光：黑暗	早晨	30min×6days	PSG；睡眠日志；OSA	亮光下睡眠质量↑
van de Putte et al., 2022	早班工人	亮光：眼位 1034lx，5000K；基线光：眼位 489lx，4000K	6:00~12:00	6h×24days	腕表	亮光干预后入睡潜伏期↑，睡眠效率↑
全天化-实验室						
Cajochen et al., 2019	成年男性	模拟日光：眼位 100lx，4000K，光谱更接近日光；控制光：眼位 100lx，4000K，450 nm	醒后至睡前	16h×2days	PSG；褪黑素	NS

Ru et al., 2022	成年人	动态光：桌位 78~1650lx，3000K~4000K~6500K；静态光：桌位 500lx，4000K	9:00~18:00	9h×2days	腕表；GSQS	动态光下主观睡眠质量↑
Stefani et al., 2021	成年男性	动态光：眼位 <1lx~83lx，2700K~3500K~5000K；静态光：眼位 87lx，4000K	醒后至睡前	16h×2days	PSG；褪黑素	动态光模式下 N1 和 N2 期的睡眠潜伏期↑；静态光模式下褪黑素开始时间延迟
Wakamura et al., 2000	成年女性	亮光：眼位 6000lx；暗光：眼位 200lx	醒后至睡前	4days	OSA	亮光下主观睡眠体验↑；睡眠指标 NS
全天化-田野						
Benedetti et al., 2022	办公室职员	优化模式：眼位 1177lx；对照模式：眼位 858lx	8:00~18:00	9h×5days	腕表；褪黑素	睡眠指标 NS；优化动态照明下的褪黑素分泌时间更早
de Kort et al., 2010	办公室职员	动态光：桌位 500~700lx，3000~4700K；静态光：桌位 500lx，3000K	8:00~18:00	10h×21days	PSQI	NS
Figueiro et al., 2020	办公室职员	蓝光：眼位 50lx，455nm；白光：眼位 200lx，6500K；红光：眼位 50lx，634 nm	蓝光 6:00~12:00；白光 12:00~13:30；红光 13:30~17:00	10h×14days	腕表；PSQI	光照干预后被试睡眠的开始和结束时间均有提前
Kompier et al., 2022	办公室职员	眼位 500~300lx，5000 K	8:30~17:30	9h×14days	腕表；睡眠日志	NS
Peeters et al., 2021	办公室职员	亮光：眼位 318lx，3676K；暗光：眼位 42lx，3264K	8:30~12:30；13:00~17:00	8h×7days	腕表；睡眠日志	NS
Shishegar et al., 2021	老年人	500~100lx，6500K~2700K	全天	24h×9days	腕表；PSQI；PROMIS	在照度和色温动态变化模式下睡眠质量↑

注：PSQI：匹兹堡睡眠质量指数；PROMIS：患者自我报告结果测量信息系统中的睡眠障碍短表；GSQS：格罗宁根睡眠质量量表；OSA：Oguri-Shirakawa-Azumi 睡眠清单。↑积极效果(如入睡潜伏期缩短，睡眠效率提高等)；NS，无显著差异。

4 日间光照改善夜间睡眠效果的影响因素

4.1 光照量

个体在日间接触到的光照暴露量不同，对睡眠的影响也不同。一项田野研究发现日间接触的光照暴露总量越高，主观睡眠质量越好(Hubalek et al., 2010)。而在地理纬度(Adamsson

et al., 2016)、季节(Flores-Villa et al., 2020; Lee et al., 2020)、以及工作场所(Daugaard et al., 2019)等的差异下，个体每日接触到的光照量存在显著差异。如针对办公室职员的田野研究发现夏季的日间光照显著高于冬季，客观睡眠质量也显著高于冬季(Figueiro & Rea, 2016)。值得注意的是，个体在日间接触到的光照暴露量也与日间的光照水平和暴露时长有关。与此同时，尽管目前少数研究提示晨间光照对优化夜间睡眠的积极作用，但不同时段光照暴露量是否会对睡眠产生差异化影响尚未可知。

4.2 光照水平

日间光照的水平也会影响其对睡眠的作用效果。照度和色温是环境光照的重要属性之一，照度越高，光照越强；色温越高，复合白光中短波长蓝光光谱的含量越高，其产生的非视觉功效就越明显(de Kort & Smolders, 2010; 汝涛涛 等, 2019)。已有实验研究提示，日间亮光暴露对夜间睡眠有积极影响。如在高照度较之于低照度的晨间光暴露下(> 1000 lx vs. < 7 lx)，被试夜间睡眠的清醒次数减少(Kohsaka et al., 2000)，清醒时间提前，主观睡眠质量提高(Zalta et al., 2019)，主观睡眠感受提高(Kohsaka et al., 1999)。田野调查也发现，日间接触到的光照强度与睡眠质量和睡眠时长呈正相关(Figueiro et al., 2017; Youngstedt et al., 2004)，而与入睡时间，睡眠潜伏期、入睡困难、睡眠中清醒次数等呈负相关(Gasperetti et al., 2021; Youngstedt et al., 2004)。直接比较不同色温的日间光照对夜间睡眠影响的研究较少，但是有研究发现日间办公室情境下暴露在富蓝白光(310 lx, 17000 K)较之于标准白光(421 lx, 4000 K)显著降低了主观睡意，提高了睡眠质量(Viola et al., 2008)。值得注意的是，无论是照度或相关色温操纵，都可以以等效视黑素照度的强度来量化，因此，揭示等效视黑素照度与睡眠间的关系，可以为改善睡眠的室内健康光环境构建提供参数设计依据。

4.3 光照时间

首先，光照的时间点会影响光照对夜间睡眠的影响。相比其他时间点(下午或晚上)，晨间的亮光暴露对睡眠有积极的影响(Carrier & Dumont, 1995)。而在上述提到的田野研究中，也发现了晨间光照量与夜间睡眠之间的正相关(Figueiro et al., 2017; Gasperetti et al., 2021)。此外，日间光照暴露时长也会影响个体接触到的光照暴露量，如有调查研究发现室内办公职员平均每天暴露在较高光照水平(如>1000 lx)下的时长较短(Hubalek et al., 2010; van Duijnhoven et al., 2021)，这使得他们日间接触到的光照暴露量较少，由此可能导致睡眠质量下降。此外，日间光暴露对睡眠的改善效果并非一蹴而就，而存在明显的时间累积效应。如有研究在干预第四天才发现晨间亮光干预对老年人夜间睡眠的积极影响(Kohsaka et al., 1999)，另一项对重度抑郁症患者的室内动态光照干预研究发现在干预两周后患者的入睡时

间才显著提前(Canazei et al., 2022)。由此提示，日间光照暴露的时间点、暴露时长以及持续时间等时间因素也是日光与睡眠关系模型中重要的影响变量。

4.4 光照模式

当前绝大多数人居空间的照明方式为全天恒定的静态光照。新近，国际照明委员会提出了一种新的照明理念，即“以人为本”的动态照明方式(CIE, 2018)，即在一天的不同时间点，光照的照度或色温随着某种预设的模式进行实时地调整与变化，以期为个体的身心功能产生更大的福祉(Kompier et al., 2020)。动态光照模式主要包括人工动态光、间歇性光照、黎明模拟光和模拟暮光(汝涛涛 等, 2019)。相比静态光照，照度或色温动态变化的光照模式能够诱发更好的非视觉功效(de Kort & Smolders, 2010)。因此探究室内动态光照模式对夜间睡眠的影响成为工程心理学与建筑设计学日渐关注的话题。

上文所提到的动态光照模式研究结果并不一致。如 Shishegar 等人(2021)的室内动态照明研究结果发现，色温动态变化的光照模式较之于色温恒定的光照模式对老年人的主客观睡眠指标均有显著改善。但也有研究并未发现动态光照模式对夜间睡眠的优化效果(Benedetti et al., 2022; Kompier et al., 2022)。此外，这些研究所采用的动态光照模式并不一致，如 Kompier 等人(2022)采用的是基于人体生物节律变化的动态光照模式，而 Shishegar 等人(2021)则考虑日间高照度高蓝光，夜间低照度低蓝光的光照模式。因此哪种动态光照模式可以更好地优化个体夜间的睡眠仍需进一步探讨。

4.5 个体特征

不同年龄阶段的群体对光照的感受敏感性不同，导致光照对睡眠的影响存在年龄差异。相比起老年人，年轻人对短波长的光更加敏感。有研究发现在短波长光的照射下老年人的褪黑素抑制水平相较于年轻人减弱(Herljevic et al., 2005)，且 REM 的潜伏期增加(Münch et al., 2011)。性别也会影响到不同光照对睡眠的影响。如有研究发现暴露在高色温的光环境下(40lx, 6500K)，虽然在褪黑素抑制方面无性别差异，但在男性睡眠中额叶的慢波活动有所增加(Chellappa et al., 2017)。此外，基因类型也是影响个体光敏感性的因素之一。生物钟基因(如 PER2，酪蛋白激酶 casein kinase 1 epsilon)的变化与人类的睡眠和昼夜节律紊乱障碍相关(Ebisawa, 2007; Toh et al., 2001)。有研究发现 PER2 单倍体纯合子导致个体对光的敏感度降低(Akiyama et al., 2017)。此外，PER3 也与对睡眠觉醒系统的调节有关(Dijk & Archer, 2010)。研究发现 PER3 的多态性会影响光照对褪黑素的抑制反应，即 6500K 较之于 2500K 光照对 $PER3^{5/5}$ 个体的内源性褪黑激素水平有明显的抑制作用，而对 $PER3^{4/4}$ 个体的内源性褪黑激素水平无显著影响(Chellappa et al., 2012)。

综上所述，日间光照改善夜间睡眠的作用效果大小可以通过构建耦合光照剂量、光照水平、作用时间、持续时长等变量的数学方程来计算，而“以人为本”健康照明方式的构建也应充分结合用户个体特征。与此同时，通过对上述调节变量的探究，也可以为人们认识日间光照改善夜间睡眠的内在作用机制提供新思路。

5 日间光照影响优化夜间睡眠的作用机制

5.1 日间光照影响睡眠的生理机制

睡眠调节的双过程模型(two-process model)认为，机体的睡眠觉醒模式是由睡眠内稳态过程(Process S)和昼夜节律过程(Process C)相互作用决定的(Borbély et al., 2016)。其中，睡眠内稳态过程反映了睡眠债，其主要依赖于睡眠和觉醒时间，在清醒状态下上升，睡眠状态下减少；而昼夜节律过程是由外部光刺激诱发机体产生的身心机能的内在节律性，如日间保持高度警觉，夜间进入无意识睡眠的低警觉状态等。如上文所述，光照可以通过重置机体的内在生物节律继而间接调节个体的夜间睡眠(Carrier & Dumont, 1995; Prayag, Munch, et al., 2019)，而另一项研究发现动态光照模式也可以促进昼夜节律适应睡眠觉醒相位的移动(Rahman et al., 2022)。核心体温和褪黑素是昼夜节律过程的生化标记物(Borbély et al., 2016)。其中，褪黑素是由松果体产生的一种神经激素(Mannino et al., 2021)，又被称为“睡眠荷尔蒙”。褪黑素在夜间(黑暗中)开始分泌和累积，它在调节昼夜节律和睡眠觉醒周期中起着关键作用(Kennaway, 2022)。很多研究采用褪黑素治疗方法(Melatonin treatment)来改善患者的睡眠障碍问题(Burgess & Emens, 2020; Hadi et al., 2022)。而褪黑素对光照的反应十分敏感，夜间即使是很低照度的光照亦能够显著抑制褪黑素的分泌与合成(Prayag, Najjar, et al., 2019)。因此，光照可以通过激活 SCN 中的受体细胞并随后抑制褪黑素分泌作为调节个体生物节律，进而控制个体睡眠觉醒行为的线索(Pandi-Perumal et al., 2022)。

光照除了可以通过影响个体的生理节律间接调节睡眠觉醒活动外(LeGates et al., 2014)，还可以通过 ipRGCs 表达的黑视蛋白直接影响个体的睡眠(Lupi et al., 2008)，即光照可以通过 ipRGCs 表达的黑视蛋白直接将神经光信号投射至负责调节睡眠觉醒活动的脑区，如腹外侧视前核 (ventrolateral preoptic nuclei, VLPO)、下丘脑室旁核下区(subparaventricular nucleus zone, SPZ)、上丘-顶盖前区(superior colliculus-pretectum, SC-PT)，以及外侧下丘(lateral hypothalamus, LH)等(Hattar et al., 2006; Lupi et al., 2008; Schmidt et al., 2011)继而直接调节机体睡眠。因此，Hubbard 等人(2013)提出了一个睡眠调节三过程模型(three-process model)。该模型认为光照对睡眠的直接调节，与昼夜节律过程和内稳态过程相互作用，从而决定了机体

的睡眠时间和品质。正如作者所言，该模型需要更多的哺乳动物模型加以检查和修正以增加模型的适用性(Hubbard et al., 2013)。

尽管上述两种理论模型可以解释光照与睡眠的关联机理，但基于当前研究结果，日间光照特性如光照水平、光照剂量和光照作用时间等对睡眠的作用关系显得更为复杂，特别是日间光照对睡眠与生物节律的影响是否存在同步性或独立性仍有待探究。

5.2 日间光照影响睡眠的心理机制

光照的警觉性效应是光照非视觉效应的重要表现之一(Lok et al., 2018; Souman et al., 2018; 汝涛涛 等, 2019)，如有研究者采用黎明模拟光照或晨间自然光暴露等方式来对抗早晨觉醒后的睡意，以提高机体的警觉性和认知功能水平(Dong & Zhang, 2021; Gabel et al., 2015)，部分晨间光照干预研究也发现在晨间亮光或蓝光干预后被试日间的主观睡意会更低(Raikes et al., 2020; Turco et al., 2018)。而个体生理警觉性水平与昼夜节律和睡眠又密切相关(Axelsson et al., 2020)。如日间动态光照的研究发现，在接受全天化动态光作用后，个体睡前1小时的警觉程度要低于静态光模式(Stefani et al., 2021)，而另一项研究也发现，控制光条件下(100 lx, 4000K)与警觉性相关的睡眠脑电频谱密度较之于基线显著增加(Cajochen, Freyburger, et al., 2019)。此外，最近一项采用强迫去同步范式的研究发现，在强迫清醒阶段，亮光暴露较之于暗光显著增加了个体的主观睡意(Lok, Woelders, van Koningsveld, et al., 2022)，同时显著增加了 NREM 期的 delta 波(0.5~4Hz)能量(Lok, Woelders, Gordijn, et al., 2022)，表明清醒阶段的亮光暴露减少了微觉醒的发生，增加了睡眠内稳态压力。由此提示，日间光照可能会通过影响个体日间或睡前的警觉性进而对睡眠产生影响。

此外，情绪体验可能也是介导日间光照影响睡眠的心理路径之一。已有研究提示，日间不同强度或色温的光环境作用能够对个体的主客观情绪产生即时性影响，而异常光照模式会诱发不良情绪体验(LeGates et al., 2014; 李芸 等, 2022)。个体的情绪状态与睡眠之间存在交互影响(Parsons et al., 2022)，如个体的积极情绪状态可以显著预测睡眠质量(Uchino et al., 2017)，而睡眠障碍、失眠等睡眠问题则会诱发个体不良情绪甚至焦虑症、抑郁等情绪障碍(Nicholson & Pfeiffer, 2021; Palagini et al., 2019)。Figueiro 等人(2021)近期在疫情期间的一项调查研究发现，白天(室内或者室外)接触的光照量越多，个体自我报告的睡眠效果越好，体验到的压力、焦虑、抑郁等负性情绪越少，而积极情绪则越高。未来的研究可以通过考察日间光暴露、情绪与睡眠三者间的动态因果关系来验证上述猜想。

6 未来研究展望

6.1 基于生物节律和睡眠优化的全天化人因动态照明设计

日班工作人群几乎三分之一的时间都是在室内建筑中度过(Kompier et al., 2022)，室内光环境水平会直接影响员工的情绪、工作效率以及睡眠健康(van Duijnhoven et al., 2019)。办公室员工日间接触高强度光照的机会较少。有调查研究发现室内办公人员平均每天暴露在 >1000 lx 光照下的时长约为 72min(van Duijnhoven et al., 2021)，而在室内时间仅 16min 左右(Hubalek et al., 2010)。长期接触较低的光线水平会对个体的身心健康和睡眠健康产生负面影响(van Duijnhoven et al., 2019)。如何构建健康的人因照明环境，使其能够对个体日间心理功能与夜间睡眠产生最优的作用效果是目前研究的热点与难点问题。据前文所述，日间光暴露对睡眠的影响存在时间效应，而个体日间的身心机能水平也呈现出节律性的动态变化(Coles et al., 2015; Schnupp et al., 2017)。因此，构建基于生物节律时间动态调整照度或色温的室内人工光环境不失为一种可能的研究思路。

6.2 日间光照影响夜间睡眠的作用机理探讨

睡眠调节的双过程模型认为睡眠是由睡眠内稳态过程(Process S)和昼夜节律过程(Process C)相互作用决定的(Borbély et al., 2016)。光照对生物节律与睡眠的调节作用已经得到了大量文献研究的支持，但值得注意的是，光照是否会对睡眠的内稳态过程产生影响目前还不清楚。有研究发现晨间的亮光暴露提前了昼夜节律和清醒时间，但是对 NREM 期的慢波活动没有影响(Dijk et al., 1989)。但是另一项研究发现在经历 40h 的睡眠限制后，日间的亮光暴露(250 lx)较之于暗光(< 8 lx)增加了 NREM 期的慢波活动(Cajochen, Reichert, et al., 2019)。而 NERM 期的慢波活动被认为是睡眠内稳态的重要生理指标，那么，日间光照是否会通过调节睡眠内稳态继而影响睡眠尚未可知。而 Hubbard 等人(2013)提出的三过程模型认为对睡眠的直接光照调节，与昼夜节律过程和内稳态过程相互作用共同决定了个体的睡眠品质。但此模型也需要更多神经生物学证据验证。因此，未来研究需要在现有基础上进一步探讨日间光照对夜间睡眠的作用机制。

6.3 基于特殊人群的光照优化睡眠的效果及方法研究

在地理纬度、职业等的差异下，个体每日接触到的光照量存在显著差异(Hubalek et al., 2010)。比如光照强度，无论是照射到地球表面的光量还是白天的长度，都会随着纬度的增加而减弱(Pearce & Dunbar, 2012)。有研究显示在冬季，北极附近(如瑞典)工作的工人接触到的自然光暴露量较少，从而会引发如睡眠不足等睡眠问题(Lubas et al., 2019)。而一些特殊职业人群，如轮班制员工(Nie et al., 2020)、地下作业场所(如地铁、隧道、矿井等)工作者(Dong et al., 2021; Yang et al., 2022)、空间站宇航员(Brainard et al., 2016)等接触到的日间光照暴露也

存在很大差异，而日光暴露不足会对从事这些职业人群的情绪、睡眠等身心健康问题产生负面影响(Carvalho & Cruz, 2017; Khaing et al., 2019)。因此，未来研究也可以针对不同人群、作业场所的特殊性和差异性，构建健康舒适的光照环境，考察其对视觉与非视觉作用绩效的影响，以及借助人工光照维护生物节律，改善睡眠，提升身心健康品质。

6.4 构建夜间睡眠对日间光照水平的剂量反应曲线模型

虽然田野研究设计在光照领域至关重要，但是如何将真实场景下复杂的光照条件精确量化是一项挑战(de Kort, 2021; Houser & Esposito, 2021)。有研究提前设定好一个阈值(如 1000 lx)，通过计算暴露在超过给定阈值的光照条件下的时间来确定光照暴露量(Hubalek et al., 2010)，这种算法实际上整合了光照强度和持续时间。后续也有研究基于此种方法探究光照与警觉性和执行控制功能之间的剂量效应(Smolders et al., 2018)。但是目前精确的日间光照影响夜间睡眠的阈限水平尚未建立。因此有研究并未设置特定的光照阈限，而是选取多个阈限水平进行敏感性探索分析(Peeters et al., 2022)。通过在一定的阈值范围内使用灵敏度分析，可以探索在特定的测量结果中，哪些特定阈值对光诱导生物效应的时间依赖性更加敏感，从而预测田野研究中光照的强度、持续时间和暴露时间点(Peeters et al., 2022)。因此，这一方法为量化不同光环境下的光照参数提供了可能。目前已有研究尝试探讨了日间光照与个体警觉性状态的剂量效应曲线(Smolders et al., 2018)，以及夜间光照对褪黑素分泌抑制的预测模型(Giménez et al., 2022)，未来研究可以基于上述算法尝试探讨构建日间光照对睡眠影响的剂量反应曲线(dose-response curve)，为个性化的照明设计提供科学参考与依据。

7 小结

光照作为重要的授时因子，会对机体的生物节律与睡眠产生显著的调节。总体而言，日间更高的光照水平或光照量可以正向预测夜间睡眠质量，但由于研究中日间光照参数(如光照水平、作用时间点、暴露时长、持续时间等)的差异，使得其对夜间睡眠的影响效果并不十分一致。而在对光照影响睡眠的作用机制探讨上仍需进一步探究。光照可以通过调节生物节律相位或激活与睡眠觉醒活动相关的脑区对睡眠产生间接或直接的影响。但是光照是否会影响个体的睡眠内稳态过程对睡眠产生影响尚未可知。此外，日间光照还可能通过影响个体的警觉性和情绪状态等心理过程继而对睡眠产生影响。在实际生活中，自然界的光暗周期与个体的生理节律之间的去同步化愈加显著，所造成的昼夜节律紊乱以及相关睡眠障碍问题也越发普遍。在人工照明技术日益发达的当下，如何去构建基于不同人群和应用场景的健康人因照明方式仍是重要议题，研究成果对提高人们的工作效率、优化睡眠以及提升身心健康水平

具有重要的社会价值。

参考文献

李芸，汝涛涛，李丝雨，陈涵宇，谢舒雅，周国富. (2022). 环境光照对情绪的影响及其作用机制. *心理科学进展*, *30*(02), 389–405.

汝涛涛，李芸，钱柳，陈庆伟，钟罗金，李静华，周国富. (2019). 环境光照的认知功效及其调节因素与作用机理. *心理科学进展*, *27*(10), 1687–1702.

Adamsson, M., Laike, T., & Morita, T. (2016). Annual variation in daily light exposure and circadian change of melatonin and cortisol concentrations at a northern latitude with large seasonal differences in photoperiod length. *Journal of Physiological Anthropology*, *36*, 6.

Akiyama, T., Katsumura, T., Nakagome, S., Lee, S. I., Joh, K., Soejima, H., . . . Oota, H. (2017). An ancestral haplotype of the human PERIOD2 gene associates with reduced sensitivity to light-induced melatonin suppression. *Plos One*, *12*(6), e0178373.

Axelsson, J., Ingre, M., Kecklund, G., Lekander, M., Wright, K. P., & Sundelin, T. (2020). Sleepiness as motivation: a potential mechanism for how sleep deprivation affects behavior. *Sleep*, *43*(6), zsz291.

Bedrosian, T. A., & Nelson, R. J. (2017). Timing of light exposure affects mood and brain circuits. *Transl Psychiatry*, *7*(1), e1017.

Benedetti, M., Maierova, L., Cajochen, C., Scartezzini, J. L., & Munch, M. (2022). Optimized office lighting advances melatonin phase and peripheral heat loss prior bedtime. *Scientific Reports*, *12*(1), 4267.

Blume, C., Garbazza, C., & Spitschan, M. (2019). Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood. *Somnologie (Berl)*, *23*(3), 147–156.

Borbély, A. A., Daan, S., Wirz-Justice, A., & Deboer, T. (2016). The two-process model of sleep regulation: a reappraisal. *Journal of Sleep Research*, *25*(2), 131–143.

Boubekri, M., Cheung, I. N., Reid, K. J., Wang, C.-H., & Zee, P. C. (2014). Impact of windows and daylight exposure on overall health and sleep quality of office workers: A case-control pilot study. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, *10*(6), 603–611.

Brainard, G. C., Barger, L. K., Soler, R. R., & Hanifin, J. P. (2016). The development of lighting countermeasures for sleep disruption and circadian misalignment during spaceflight. *Current Opinion in Pulmonary Medicine*, *22*(6), 535–544.

Burgess, H. J., & Emens, J. S. (2020). Drugs used in circadian sleep-wake rhythm disturbances. *Sleep Medicine Clinics*, *15*(2), 301–310.

Cajochen, C., Freyburger, M., Basishvili, T., Garbazza, C., Rudzik, F., Renz, C., . . . Weibel, J. (2019). Effect of daylight LED on visual comfort, melatonin, mood, waking performance and sleep. *Lighting Research & Technology*, *51*(7), 1044–1062.

Cajochen, C., Reichert, C., Maire, M., Schlangen, L. J. M., Schmidt, C., Viola, A. U., & Gabel, V. (2019). Evidence that homeostatic sleep regulation depends on ambient lighting conditions during wakefulness. *Clocks & sleep*, *1*(4), 517–531.

Canazei, M., Weninger, J., Pohl, W., Marksteiner, J., & Weiss, E. M. (2022). Effects of dynamic bedroom lighting on measures of sleep and circadian rest-activity rhythm in inpatients with major depressive disorder. *Scientific Reports*, *12*(1), 6137.

Cappuccio, F. P., D'Elia, L., Strazzllillo, P., & Miller, M. A. (2010). Quantity and quality of sleep and incidence of type 2 diabetes - a systematic review and meta-analysis. *Diabetes Care*, *33*(2), 414–420.

Carrier, J., & Dumont, M. (1995). Sleep propensity and sleep architecture after bright light exposure at three different

times of day. *Journal of Sleep Research*, *4*(4), 202–211.

Carvalho, A., & Cruz, M. M. E. (2017). Reduced light exposure negatively impacts sleep quality and alertness in underground-operating subway workers. *Sleep*, *40*, A253–A254.

Chang, A.-M., Aeschbach, D., Duffy, J. F., & Czeisler, C. A. (2015). Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *112*(4), 1232–1237.

Chellappa, S. L., Steiner, R., Oelhafen, P., & Cajochen, C. (2017). Sex differences in light sensitivity impact on brightness perception, vigilant attention and sleep in humans. *Scientific Reports*, *7*, 14215.

Chellappa, S. L., Viola, A. U., Schmidt, C., Bachmann, V., Gabel, V., Maire, M., . . . Cajochen, C. (2012). Human melatonin and alerting response to blue-enriched light depend on a polymorphism in the clock gene PER3. *Journal Of Clinical Endocrinology & Metabolism*, *97*(3), E433–437.

Cho, C.-H., Yoon, H.-K., Kang, S.-G., Kim, L., Lee, E.-I., & Lee, H.-J. (2018). Impact of exposure to dim light at night on sleep in female and comparison with male subjects. *Psychiatry Investigation*, *15*(5), 520-530.

Cho, J. R., Joo, E. Y., Koo, D. L., & Hong, S. B. (2013). Let there be no light: the effect of bedside light on sleep quality and background electroencephalographic rhythms. *Sleep Medicine*, *14*(12), 1422–1425.

CIE. (2018). *System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light*, Vienna.

Coles, M. E., Schubert, J. R., & Nota, J. A. (2015). Sleep, circadian rhythms, and anxious traits. *Current Psychiatry Reports*, 17(9), 73.

Corbett, R. W., Middleton, B., & Arendt, J. (2012). An hour of bright white light in the early morning improves performance and advances sleep and circadian phase during the Antarctic winter. *Neuroscience Letters*, *525*(2), 146–151.

Daugaard, S., Markvart, J., Bonde, J. P., Christoffersen, J., Garde, A. H., Hansen, A. M., . . . Kolstad, H. A. (2019). Light exposure during days with night, outdoor, and indoor work. *Annals of Work Exposures and Health*, *63*(6), 651–665.

Dautovich, N. D., Schreiber, D. R., Imel, J. L., Tighe, C. A., Shoji, K. D., Cyrus, J., . . . Dzierzewski, J. M. (2019). A systematic review of the amount and timing of light in association with objective and subjective sleep outcomes in community-dwelling adults. *Sleep Health*, *5*(1), 31–48.

de Kort, Y. (2021). Opinion: On becoming smart. *Lighting Research & Technology*, *53*(1), 4.

de Kort, Y. A. W., & Smolders, K. (2010). Effects of dynamic lighting on office workers: First results of a field study with monthly alternating settings. *Lighting Research & Technology*, *42*(3), 345–360.

Dijk, D. J., & Archer, S. N. (2010). PERIOD3, circadian phenotypes, and sleep homeostasis. *Sleep Medicine Reviews*, *14*(3), 151–160.

Dijk, D. J., Beersma, D. G. M., Daan, S., & Lewy, A. J. (1989). Bright morning light advances the human circadian system without affecting NREM sleep homeostasis. *American Journal of Physiology*, *256*(2), R106–R111.

Dijk, D. J., Visscher, C. A., Bloem, G. M., Beersma, D. G. M., & Daan, S. (1987). Reduction of human sleep duration after bright light exposure in the morning. *Neuroscience Letters*, *73*(2), 181–186.

Dong, X., Wu, Y. Y., Chen, X. D., Li, H., Cao, B., Zhang, X., . . . Li, X. T. (2021). Effect of thermal, acoustic, and lighting environment in underground space on human comfort and work efficiency: A review. *Science of the Total Environment*, *786*, 147537.

Dong, Y., & Zhang, X. (2021). Study on the effect of awakening daylight in dormitories on morning alertness, mood, fatigue and sleep quality of college students. *Building and Environment*, *203*, 108060.

Dowling, G. A., Hubbard, E. M., Mastick, J., Luxenberg, J. S., Burr, R. L., & Van Someren, E. J. W. (2005). Effect of morning bright light treatment for rest-activity disruption in institutionalized patients with severe alzheimer's disease. *International Psychogeriatrics*, *17*(2), 221–236.

Dumont, M., & Carrier, J. (1997). Daytime sleep propensity after moderate circadian phase shifts induced with bright light exposure. *Sleep*, 20(1), 11–17.

Ebisawa, T. (2007). Circadian rhythms in the CNS and peripheral clock disorders: human sleep disorders and clock genes. *Journal of Pharmacological Sciences*, *103*(2), 150–154.

Emens, J. S., Berman, A. M., Thosar, S. S., Butler, M. P., Roberts, S. A., Clemons, N. A., . . . Shea, S. A. (2020). Circadian rhythm in negative affect: Implications for mood disorders. *Psychiatry Research*, *293*, 113337.

Figueiro, M. G., Jarboe, C., & Sahin, L. (2021). The sleep maths: A strong correlation between more daytime light and better night-time sleep. *Lighting Research & Technology*, *53*(5), 423–435.

Figueiro, M. G., & Rea, M. S. (2012). Short-wavelength light enhances cortisol awakening response in sleep-restricted adolescents. *International Journal of Endocrinology*, *2012*, 301935.

Figueiro, M. G., & Rea, M. S. (2016). Office lighting and personal light exposures in two seasons: Impact on sleep and mood. *Lighting Research & Technology*, *48*(3), 352–364.

Figueiro, M. G., Steverson, B., Heerwagen, J., Kampschroer, K., Hunter, C. M., Gonzales, K., . . . Rea, M. S. (2017). The impact of daytime light exposures on sleep and mood in office workers. *Sleep Health*, *3*(3), 204–215.

Figueiro, M. G., Steverson, B., Heerwagen, J., Yucel, R., Roohan, C., Sahin, L., . . . Rea, M. S. (2020). Light, entrainment and alertness: A case study in offices. *Lighting Research & Technology*, *52*(6), 736–750.

Flores-Villa, L., Unwin, J., & Raynham, P. (2020). Assessing the impact of daylight exposure on sleep quality of people over 65 years old. *Building Services Engineering Research & Technology*, *41*(2), 183–192.

Gabel, V., Maire, M., Reichert, C. F., Chellappa, S. L., Schmidt, C., Hommes, V., . . . Viola, A. U. (2015). Dawn simulation light impacts on different cognitive domains under sleep restriction. *Behavioural Brain Research*, *281*, 258–266.

Gasperetti, C. E., Dolsen, M. R., & Harvey, A. G. (2021). The influence of intensity and timing of daily light exposure on subjective and objective sleep in adolescents with an evening circadian preference. *Sleep Medicine*, *79*, 166–174.

Giménez, M. C., Stefani, O., Cajochen, C., Lang, D., Deuring, G., & Schlangen, L. J. M. (2022). Predicting melatonin suppression by light in humans: Unifying photoreceptor-based equivalent daylight illuminances, spectral composition, timing and duration of light exposure. *Journal of Pineal Research*, *72*(2), e12786.

Hadi, F., Agah, E., Tavanbakhsh, S., Mirsepassi, Z., Mousavi, S. V., Talachi, N., . . . Aghamollaii, V. (2022). Safety and efficacy of melatonin, clonazepam, and trazodone in patients with Parkinson's disease and sleep disorders: A randomized, double-blind trial. *Neurological Sciences*, *43*(10), 6141–6148.

Hartstein, L. E., Diniz Behn, C., Wright, K. P., Jr., Akacem, L. D., Stowe, S. R., & LeBourgeois, M. K. (2022). Evening light intensity and phase delay of the circadian clock in early childhood. *Journal of Biological Rhythms*, 07487304221134330.

Hattar, S., Kumar, M., Park, A., Tong, P., Tung, J., Yau, K. W., & Berson, D. M. (2006). Central projections of melanopsin-expressing retinal ganglion cells in the mouse. *Journal of Comparative Neurology*, *497*(3), 326–349.

He, M. H., Ru, T. T., Li, S. Y., Li, Y., & Zhou, G. F. (2022). Shine light on sleep: Morning bright light improves nocturnal sleep and next morning alertness among college students. *Journal of Sleep Research*, e13724.

Herljevic, M., Middleton, B., Thapan, K., & Skene, D. J. (2005). Light-induced melatonin suppression: Age-related reduction in response to short wavelength light. *Experimental Gerontology*, *40*(3), 237–242.

Houser, K. W., & Esposito, T. (2021). Human-centric lighting: Foundational considerations and a five-step design process. *Frontiers in Neurology*, *12*, 630553.

Hubalek, S., Brink, M., & Schierz, C. (2010). Office workers' daily exposure to light and its influence on sleep quality and mood. *Lighting Research & Technology*, *42*(1), 33–50.

Hubbard, J., Ruppert, E., Gropp, C. M., & Bourgin, P. (2013). Non-circadian direct effects of light on sleep and alertness: Lessons from transgenic mouse models. *Sleep Medicine Reviews*, *17*(6), 445–452.

Huiberts, L. M., Smolders, K. C. H. J., & de Kort, Y. A. W. (2015). Shining light on memory: Effects of bright light on working memory performance. *Behavioural Brain Research*, *294*, 234–245.

Kennaway, D. J. (2022). What do we really know about the safety and efficacy of melatonin for sleep disorders? *Current Medical Research and Opinion*, *38*(2), 211–227.

Khaing, N. E. E., Abuduxike, G., Posadzki, P., Divakar, U., Visvalingam, N., Nazeha, N., . . . Car, J. (2019). Review of the potential health effects of light and environmental exposures in underground workplaces. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *84*, 201–209.

Khalsa, S. B. S., Jewett, M. E., Cajochen, C., & Czeisler, C. A. (2003). A phase response curve to single bright light pulses in human subjects. *Journal of Physiology-London*, *549*(3), 945–952.

Kohsaka, M., Fukuda, N., Honma, H., Kobayashi, R., Sakakibara, S., Koyama, E., . . . Matsubara, H. (1999). Effects of moderately bright light on subjective evaluations in healthy elderly women. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, *53*(2), 239–241.

Kohsaka, M., Fukuda, N., Kobayashi, R., Honma, H., Sakakibara, S., Koyama, E., . . . Matsubara, H. (2000). Effect of short duration morning bright light in elderly men: Sleep structure. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, *54*(3), 367–368.

Kompier, M. E., Smolders, K. C. H. J., & de Kort, Y. A. W. (2020). A systematic literature review on the rationale for and effects of dynamic light scenarios. *Building and Environment*, *186*, 107326.

Kompier, M. E., Smolders, K. C. H. J., Kramer, R. P., van Marken Lichtenbelt, W. D., & de Kort, Y. A. W. (2022). Contrasting dynamic light scenarios in an operational office: Effects on visual experience, alertness, cognitive performance, and sleep. *Building and Environment*, *212*, 108844.

Lee, E. E., Amritwar, A., Hong, L. E., Mohyuddin, I., Brown, T., & Postolache, T. T. (2020). Daily and seasonal variation in light exposure among the old order amish. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(12), 4460.

LeGates, T. A., Fernandez, D. C., & Hattar, S. (2014). Light as a central modulator of circadian rhythms, sleep and affect. *Nature Reviews Neuroscience*, *15*(7), 443–454.

Li, L., Wang, Y. Y., Wang, S. B., Zhang, L., Li, L., Xu, D. D., . . . Xiang, Y. T. (2018). Prevalence of sleep disturbances in Chinese university students: A comprehensive meta-analysis. *Journal of Sleep Research*, *27*(3), e12648.

Li, Y., Zhou, Y., Ru, T. T., Niu, J. X., He, M. H., & Zhou, G. F. (2021). How does the COVID-19 affect mental health and sleep among Chinese adolescents: A longitudinal follow-up study. *Sleep Medicine*, *85*, 246–258.

Lok, R., Smolders, K., Beersma, D. G. M., & de Kort, Y. A. W. (2018). Light, alertness, and alerting effects of white light: A literature overview. *Journal of Biological Rhythms*, *33*(6), 589–601.

Lok, R., Woelders, T., Gordijn, M. C. M., van Koningsveld, M. J., Oberman, K., Fuhler, S. G., . . . Hut, R. A. (2022). Bright light during wakefulness improves sleep quality in healthy men: A forced desynchrony study under dim and bright light (III). *Journal of Biological Rhythms*, 37(4), 429–441.

Lok, R., Woelders, T., van Koningsveld, M. J., Oberman, K., Fuhler, S. G., Beersma, D. G. M., & Hut, R. A. (2022). Bright light increases alertness and not cortisol in healthy men: A forced desynchrony study under dim and bright light (I). *Journal of Biological Rhythms*, 37(4), 403–416.

Lu, L., Wang, S. B., Rao, W. W., Ungvari, G. S., Ng, C. H., Chiu, H. F. K., . . . Xiang, Y. T. (2017). Sleep duration and patterns in chinese older adults: A comprehensive meta-analysis. *International Journal of Biological Sciences*, *13*(6), 682–689.

Lubas, M. M., Maduro, R. S., & Szklo-Coxe, M. (2019). An exploratory study examining the associations between sunlight exposure, sleep behaviours and sleep outcomes during an arctic summer. *International Journal of*

Circumpolar Health, *78*(1), 1574698.

Lupi, D., Oster, H., Thompson, S., & Foster, R. G. (2008). The acute light-induction of sleep is mediated by OPN4-based photoreception. *Nature Neuroscience*, *11*(9), 1068–1073.

Mannino, G., Pernici, C., Serio, G., Gentile, C., & Bertea, C. M. (2021). Melatonin and phytomelatonin: Chemistry, biosynthesis, metabolism, distribution and bioactivity in plants and animals—An overview. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(18), 9996.

Misiunaite, I., Eastman, C. I., & Crowley, S. J. (2020). Circadian phase advances in response to weekend morning light in adolescents with short sleep and late bedtimes on school nights. *Frontiers in Neuroscience*, *14*, 99.

Münch, M., Scheuermaier, K. D., Zhang, R., Dunne, S. P., Guzik, A. M., Silva, E. J., . . . Duffy, J. F. (2011). Effects on subjective and objective alertness and sleep in response to evening light exposure in older subjects. *Behavioural Brain Research*, *224*(2), 272–278.

Nicholson, W. C., & Pfeiffer, K. (2021). Sleep disorders and mood, anxiety, and post-traumatic stress disorders: Overview of clinical treatments in the context of sleep disturbances. *Nursing Clinics of North America*, 56(2), 229-247.

Nie, J. X., Zhou, T. H., Chen, Z. Z., Dang, W. M., Jiao, F., Zhan, J. L., . . . Shen, B. (2020). Investigation on entraining and enhancing human circadian rhythm in closed environments using daylight -like LED mixed lighting. *Science of the Total Environment*, *732*, 139334.

Obayashi, K., Saeki, K., & Kurumatani, N. (2014). Association between light exposure at night and insomnia in the general elderly population: The HEIJO-KYO cohort. *Chronobiology International*, *31*(9), 976–982.

Palagini, L., Bastien, C. H., Marazziti, D., Ellis, J. G., & Riemann, D. (2019). The key role of insomnia and sleep loss in the dysregulation of multiple systems involved in mood disorders: A proposed model. *Journal of Sleep Research*, 28(6), e12841.

Pandi-Perumal, S. R., Cardinali, D. P., Zaki, N. F. W., Karthikeyan, R., Spence, D. W., Reiter, R. J., & Brown, G. M. (2022). Timing is everything: Circadian rhythms and their role in the control of sleep. *Frontiers in Neuroendocrinology*, *66*, 100978.

Parsons, C. E., Schofield, B., Batziou, S. E., Ward, C., & Young, K. S. (2022). Sleep quality is associated with emotion experience and adaptive regulation of positive emotion: An experience sampling study. *Journal of Sleep Research*, *31*(4), e13533.

Pearce, E., & Dunbar, R. (2012). Latitudinal variation in light levels drives human visual system size. *Biology Letters*, *8*(1), 90–93.

Peeters, S. T., Smolders, K. C. H. J., Kompier, M. E., & de Kort, Y. A. W. (2022). Let me count the light. Accounting for intensity, duration and timing of light when predicting sleep and subjective alertness in field studies. *Leukos*, *18*(4), 417–437.

Peeters, S. T., Smolders, K. C. H. J., Vogels, I. M. L. C., & De Kort, Y. A. W. (2021). Less is more? Effects of more vs. less electric light on alertness, mood, sleep and appraisals of light in an operational office. *Journal of Environmental Psychology*, *74*, 101583.

Prayag, A. S., Munch, M., Aeschbach, D., Chellappa, S. L., & Gronfier, C. (2019). Light modulation of human clocks, wake, and sleep. *Clocks & sleep*, *1*(1), 193–208.

Prayag, A. S., Najjar, R. P., & Gronfier, C. (2019). Melatonin suppression is exquisitely sensitive to light and primarily driven by melanopsin in humans. *Journal of Pineal Research*, 66(4), e12562.

Rahman, S. A., St Hilaire, M. A., Grant, L. K., Barger, L. K., Brainard, G. C., Czeisler, C. A., . . . Lockley, S. W. (2022). Dynamic lighting schedules to facilitate circadian adaptation to shifted timing of sleep and wake. *Journal of Pineal Research*, *73*(1), e12805.

Raikes, A. C., Dailey, N. S., Shane, B. R., Forbeck, B., Alkozei, A., & Killgore, W. D. S. (2020). Daily morning blue

light therapy improves daytime sleepiness, sleep quality, and quality of life following a mild traumatic brain injury. *Journal of Head Trauma Rehabilitation*, *35*(5), E405–E421.

Ru, T., de Kort, Y. A. W., Smolders, K. C. H. J., Chen, Q., & Zhou, G. (2019). Non-image forming effects of illuminance and correlated color temperature of office light on alertness, mood, and performance across cognitive domains. *Building and Environment*, *149*, 253–263.

Ru, T., Kompier, M. E., Chen, Q., Zhou, G., & Smolders, K. C. H. J. (2022). Temporal tuning of illuminance and spectrum: Effect of a full-day dynamic lighting pattern on well-being, performance and sleep in simulated office environment. *Building and Environment*, *228*, 109842.

Ru, T., Smolders, K., Chen, Q., Zhou, G., & de Kort, Y. A. W. (2021). Diurnal effects of illuminance on performance: Exploring the moderating role of cognitive domain and task difficulty. *Lighting Research & Technology*, 53(8), 727–747.

Schmidt, T. M., Chen, S. K., & Hattar, S. (2011). Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells: many subtypes, diverse functions. *Trends in Neurosciences*, *34*(11), 572–580.

Schnupp, T., Heinze, C., & Golz, M. (2017). Circadian rhythmicity of cognitive performance. *Current Directions in Biomedical Engineering*, 3(2), 569–572.

Shishegar, N., Boubekri, M., Stine-Morrow, E. A. L., & Rogers, W. A. (2021). Tuning environmental lighting improves objective and subjective sleep quality in older adults. *Building and Environment*, *204*, 108096.

Smolders, K. C. H. J., Peeters, S. T., Vogels, I. M. L. C., & de Kort, Y. A. W. (2018). Investigation of dose-response relationships for effects of white light exposure on correlates of alertness and executive control during regular daytime working hours. *Journal of Biological Rhythms*, *33*(6), 649–661.

Souman, J. L., Tinga, A. M., te Pas, S. F., van Ee, R., & Vlaskamp, B. N. S. (2018). Acute alerting effects of light: A systematic literature review. *Behavioural Brain Research*, *337*, 228–239.

Stefani, O., Freyburger, M., Veitz, S., Basishvili, T., Meyer, M., Weibel, J., . . . Cajochen, C. (2021). Changing color and intensity of LED lighting across the day impacts on circadian melatonin rhythms and sleep in healthy men. *Journal of Pineal Research*, *70*(3), e12714.

Toh, K. L., Jones, C. R., He, Y., Eide, E. J., Hinz, W. A., Virshup, D. M., . . . Fu, Y. H. (2001). An hPer2 phosphorylation site mutation in familial advanced sleep phase syndrome. *Science*, *291*(5506), 1040–1043.

Turco, M., Cazzagon, N., Franceschet, I., Formentin, C., Frighetto, G., Giordani, F., . . . Montagnese, S. (2018). Morning bright light treatment for sleep-wake disturbances in primary biliary cholangitis: A pilot study. *Frontiers in Physiology*, *9*, 1530.

Uchino, B. N., Cribbet, M., de Grey, R. G. K., Cronan, S., Trettevik, R., & Smith, T. W. (2017). Dispositional optimism and sleep quality: A test of mediating pathways. Journal of Behavioral Medicine, 40(2), 360–365.

van de Putte, E., Kindt, S., Bracke, P., Stevens, M., Vansteenkiste, M., Vandevivere, L., & Ryckaert, W. R. (2022). The influence of integrative lighting on sleep and cognitive functioning of shift workers during the morning shift in an assembly plant. *Applied Ergonmics*, *99*, 103618.

van Duijnhoven, J., Aarts, M. P. J., Aries, M. B. C., Rosemann, A. L. P., & Kort, H. S. M. (2019). Systematic review on the interaction between office light conditions and occupational health: Elucidating gaps and methodological issues. *Indoor and Built Environment*, *28*(2), 152–174.

van Duijnhoven, J., Aarts, M. P. J., & Kort, H. S. M. (2021). Personal lighting conditions of office workers: An exploratory field study. *Lighting Research & Technology*, *53*(4), 285–310.

Viola, A. U., James, L. M., Schlangen, L. J. M., & Dijk, D.-J. (2008). Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality. *Scandinavian Journal of Work Environment & Health*, *34*(4), 297–306.

Wakamura, T., & Tokura, H. (2000). The influence of bright light during the daytime upon circadian rhythm of core temperature and its implications for nocturnal sleep. *Nursing and Health Sciences*, *2*(1), 41–49.

Wams, E. J., Woelders, T., Marring, I., van Rosmalen, L., Beersma, D. G. M., Gordijn, M. C. M., & Hut, R. A. (2017). Linking light exposure and subsequent sleep: A field polysomnography study in humans. *Sleep*, 40(12), zsx165.

Wang, Y. X., Hou, W. Y., Siddiqi, S. M., Sun, C. H., Han, T. S., & Yang, J. J. (2020). Association of sleep trajectory in adulthood with risk of hypertension and its related risk factors: the China Health and Nutrition Survey. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, *16*(4), 515–521.

Wen, P. J., Tan, F. Y., Wu, M., Cai, Q. J., Xu, R. P., Zhang, X. W., . . . Hu, X. D. (2021). The effects of different bedroom light environments in the evening on adolescents. *Building and Environment*, *206*, 108321.

Yang, B., Yao, H. C., & Wang, F. M. (2022). A review of ventilation and environmental control of underground spaces. *Energies*, *15*(2), 409.

Youngstedt, S. D., Leung, A., Kripke, D. F., & Langer, R. D. (2004). Association of morning illumination and window covering with mood and sleep among post-menopausal women. *Sleep and Biological Rhythms*, *2*(3), 174–183.

Zalta, A. K., Bravo, K., Valdespino-Hayden, Z., Pollack, M. H., & Burgess, H. J. (2019). A placebo-controlled pilot study of a wearable morning bright light treatment for probable PTSD. *Depression and Anxiety*, *36*(7), 617–624.

The optimization effects of daytime light exposure on sleep and its mechanisms

HE Meiheng [1, 2], RU Taotao [2], LI Siyu [1, 2], LI Le [3], ZHANG Chenze [1, 2], ZHOU Guofu [2, 3]

([1] Lab of Lighting and Physio-psychological Health, School of Psychology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

([2] National Center for International Research on Green Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

([3] South China Academy of Advanced Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: As a dominant Zeitgeber, ambient light can regulate sleep-wake patterns in humans. Exposure to higher light levels or more light exposure during the daytime, especially during the morning, positively predict nighttime sleep quality, but this effect is mediated by the light parameters (e.g., light level or spectrum), timing factors (e.g., time of day and duration), and light pattern. On the one hand, light can indirectly influence the sleep-wake cycle by regulating individuals' circadian rhythms through the suprachiasmatic nucleus (SCN). On the other hand, light can directly affect sleep through the projection of melanopsin expressed by intrinsically photosensitive retinal ganglion cells (ipRGCs) to sleep- and wakefulness-related brain regions. However, there is still no clear consensus on whether light can affect sleep via regulation of sleep homeostatic process, which was another process driven the sleep-wake cycle. Future research should pay more attention on how to create "Human centric lighting" for those who work in the absence of daylight or need personal light to support their mental and physical requirement.

Keywords: daytime light, sleep improvement, healthy lighting, mechanism, circadian rhythm